

高温强光胁迫对苹果果皮 PPO 活性的影响

张建光, 陈少春, 李英丽, 邸 葆, 张健强, 刘玉芳

(河北农业大学园艺学院, 保定 071001)

摘要: 苹果果实日烧是一种普遍发生的生理病害, 最常见的特征之一就是在果实表面出现褐变。通常认为 PPO 与植物的酶促褐变密切相关。研究了自然和控制条件下, 高温强光胁迫对果实 PPO 活性的影响, 以便揭示高温强光胁迫下苹果果实褐变与 PPO 活性之间的联系。结果表明: 高温和强光胁迫与果皮 PPO 活性变化密切相关。就树冠不同方位而言, 西南方位是高温和强光胁迫最严重的区域, 其外围裸露果实的 PPO 活性也最强。在一定范围内, 随着处理温度和光照强度的升高, 果皮 PPO 活性也逐渐增强。短时间剧烈升温能够引起 PPO 活性骤然上升。在同样程度的高温胁迫下, 提高环境湿度有利于抑制果皮 PPO 活性, 从而减轻褐变症状的发生。室内外试验一致证实: 果实日烧褐变现象与高温强光胁迫下果皮组织 PPO 活性大幅度提高有直接关系。

关键词: 苹果; 果实; 高温; 强光; 胁迫; PPO

文章编号: 1000-0933(2008)10-4645-07 中图分类号: Q142, Q948, S661.1 文献标识码: A

Effect of high temperature and excessive light stresses on PPO activity in apple peel

ZHANG Jian-Guang, CHEN Shao-Chun, LI Ying-Li, DI Bao, ZHANG Jian-Qiang, LIU Yu-Fang

College of Horticulture, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 28(10): 4645 ~ 4651.

Abstract: Apple fruit sunburn is a common disorder and one of the distinguishable symptoms is that browning color appears on the exposed side of a fruit. It has been taken for granted that PPO is absolutely involved in the browning process of plant tissues or organs under stressed conditions. The present experiment was conducted to examine the effect of high temperature and excessive light stresses on PPO activity in fruit peel under both laboratory and field conditions, so that the relationship could be disclosed between the occurrence of fruit browning and PPO activity in peel tissues stressed by high temperature and excessive solar radiation. The results indicated that a close relationship was found between the stressed extent of both high temperature and excessive light, and PPO activity in apple peel. As far as different exposures of a tree canopy were concerned, the highest PPO activity existed in exposed fruits on SW exposure where they were frequently stressed most severely. Within a certain range, PPO activity in fruit peel increased gradually with a rise of temperature and light intensity and an abrupt temperature increasing could result in a dramatic growth in PPO activity. Under the same high-temperature stressed conditions, a higher relative humidity was favorable to inhabiting PPO activity in fruit peel, thus reducing the risk of heat-related damage. The results consistently confirmed that the browning process of sunburn fruit was associated directly with the significant increase in PPO activity in fruit peel.

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(303203)

收稿日期: 2007-06-03; **修订日期:** 2007-08-26

作者简介: 张建光(1957 ~), 男, 河北武安人, 博士, 教授, 主要从事果树栽培及生理学研究. E-mail: zhjg570315@sina.com

Foundation item: The project was financially supported by Natural Science Foundation of Hebei Province(No. 303203)

Received date: 2007-06-03; **Accepted date:** 2008-08-26

Biography: ZHANG Jian-Guang, Ph. D., Professor, mainly engaged in fruit growing and physiology. E-mail: zhjg570315@sina.com

Key Words: apple; fruit; high temperature; excessive light; stress; PPO

苹果果实日烧是一种常见的生理病害,通常认为与高温和强光胁迫下果皮组织发生的生物氧化作用有关^[1~3]。果实日烧的症状有多种,最常见的特征之一就是在果实表面出现褐变,极大地影响果实的商品价值^[4,5]。一般认为,多酚氧化酶(PPO, EC1.14.18.1)是植物体中广泛分布的核基因编码的质体铜金属酶,与植物的酶促褐变密切相关。尤其是当植物受到机械损伤或病菌侵染后,PPO 能迅速催化酚与 O₂ 发生氧化反应形成醌,使组织发生褐变,以防止或减轻感染,提高抗病能力。果实一旦发生褐变,就会丧失或降低经济价值。所以 PPO 与果实关系的研究多围绕着如何避免褐变而展开^[6,7]。研究表明:荔枝、香蕉、油梨果实褐变主要是由于 PPO 催化的酶促褐变所致^[8~10]。然而,迄今为止苹果果实日烧褐变过程与 PPO 活性变化的关系尚不清楚。本试验目的在于揭示高温和强光胁迫下苹果果实 PPO 活性变化规律以及褐变发生与酶活性的关系,以便为今后深入研究适宜的预防措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2005~2006 年在河北农业大学农业部果树重点学科实验室和保定市新市区北章果园进行。试材为 10 年生红富士(*Malus domestica* Borkh. cv. Red Fuji)苹果树,砧木为八棱海棠。试验园株行距为 3m × 5m,全园通风透光良好,树形采用自由纺锤形,栽培管理水平较高。在园中选择光照条件良好、长势一致、树势中庸、挂果适量且分布均匀的植株作为试验树。

1.2 研究内容

1.2.1 树冠不同方位果实生态条件比较

选择 3 株树冠较丰满,大枝分布均匀的植株,在树冠东南(SE)、西南(SW)、西北(NW)和东北(NE)四个方位距地面 1.5m 左右的树冠外围,各选择 3 个果实。另外,在树冠内膛(IC: Interior canopy)无直接光照射的部位也选择 3 个果实。在气温较高的 7 月份,连续经历 3 个晴天,第 3 天 8:00~15:00,使用热电偶测温仪(型号:JM222),每隔 1 h 测定所有监测果实外表面温度(朝向树冠外的果面),用照度计(型号:PES1332A)测定果面光照强度,同时记录当时的环境气温和光照强度。

1.2.2 树冠不同方位果实表皮 PPO 活性比较

在气温较高的 7 月连续经历 3 个晴天,于第 3 天 15:00 摘取不同方位的果实,带回实验室,立即削取果实阳面表皮(包括表皮及近表皮少部分果肉组织,厚度约为 0.5~1.0 mm,下同),放入 -72℃ 冰箱中冷冻固定。每个处理 3 个果实,重复 3 次。试验采用随机区组设计,试验结果的显著性差异采用邓肯式新复极差测验(下同)。

1.2.3 不同日烧程度果实表皮 PPO 活性比较

在 8 月份选正常果(N: normal fruit, 无日烧症状)、白化日烧果(B: bleaching fruit, 果皮已褪绿变白)和褐变日烧果(S: sunburn browning fruit, 果皮已变褐)各 9 个,带回实验室,立即削取具有相应症状的果实表皮,放入 -72℃ 冰箱中冷冻固定。试验采用完全随机设计,每个处理 3 个果实,重复 3 次。

1.2.4 不同温度处理果实表皮 PPO 活性比较

7 月选择大小均匀、长势一致的离体果,用保鲜膜包严。将果实分别置于 25℃、35℃、48℃ 和 55℃ 水浴箱中,恒温处理 20 min。正式处理前进行预热处理,当果实表面达到预定温度时开始计时。处理过程中用多点测温仪(型号:TH-74,上海求精仪表厂制造)监测果实表面温度。试验采用完全随机设计,每个处理 3 个果实,重复 3 次,在室温下静置 1 h 后,削取果实阳面表皮,放入 -72℃ 冰箱中冷冻固定。

1.2.5 不同升温模式果实表皮 PPO 活性比较

8 月选择大小均匀、长势一致的离体果,用保鲜膜包好,放在恒温水浴箱中。处理分以下 3 种:(1)渐进升温处理(T_1):果实温度分 4 站由 30℃ 升至 48℃ (30℃→35℃→40℃→48℃);(2)直接升温处理(T_2):果实温

度分 2 站由 30℃ 升至 48℃ (30℃→48℃); (3) 波动升温处理(T_3): 果实温度分 4 站由 30℃ 升至 48℃ (30℃→45℃→30℃→48℃)。 T_1 和 T_3 处理时间共计 24 h。处理过程中, 达到 30℃、35℃、40℃ 或 45℃ 站点温度时, 恒温 4 h, 达到最终站点温度(48℃)时, 恒温 20 min。剩余处理时间均摊在站点之间温变过程中, 如 T_1 处理, 每 2 个站点温度之间持续时间大约为 3 h 53 min, 也就是说在此时间内果实温度逐渐升到下个站点温度。直接升温处理(T_2)时间为 8 h, 也就是在 30℃ 恒温 4 h 后, 再经 3 h 40 min 由 30℃ 升至 48℃, 然后恒温 20 min。正式处理前进行预热处理, 当果实表面达到预定温度时开始计时。处理过程中用多点测温仪监测果实表面温度。试验采用完全随机设计, 每个处理 3 个果实, 重复 3 次, 在室温下静置 1 h 后, 削取果实阳面表皮, 放入 -72℃ 冰箱中冷冻固定。

1.2.6 不同湿度处理果实表皮 PPO 活性比较

8 月选择均匀一致的离体果实, 置于调温调湿箱内(型号: DL302A, 上海锦屏仪器仪表有限公司通州分公司生产)。处理温度为 30℃ 和 48℃, 相对湿度分别调节在 30% 和 70%, 处理时间为 2 h。在处理过程中用多点测温仪监测果实表面温度。正式处理前进行预热处理, 当果温达到预定温度开始计时。处理结束后, 取出果实, 在室温下静置 1 h 后, 立即削取果实阳面表皮, 放入 -72℃ 冰箱中冷冻固定。试验采用完全随机设计, 每个处理 3 个果实, 重复 3 次。

1.2.7 不同光照强度处理果实表皮 PPO 活性比较

7 月份, 对树冠西南方位的果实进行以下 3 种处理: 黑布(BC: black cloth)、遮阳网(SN: shade net)和对照(full sun)。在晴天, 选择不同遮荫处理的果实, 于 12:00~15:00 记录处理期间的光照强度。以自然光照果实接受的光照强度作为 100%, 黑布处理 <5%, 遮阳网处理约为 70%。15:00 摘取不同方位的果实, 带回实验室。在室温下静置 1 h 后, 削取果实阳面表皮, 放入 -72℃ 冰箱中冷冻固定。试验采用随机区组设计, 每个处理 3 个果实, 重复 3 次。

1.3 PPO 活性测定方法

主要参照张志良的方法^[11], 并做了适当改进。取果实表皮 0.5 g, 用 5 ml 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH 6.8)提取, 冰浴研磨, 10000 r/min 冷冻离心 25 min(4℃)。上清液即为待测液。取 0.1 ml 待测液, 加入 2 ml 邻苯二酚、2 ml 磷酸缓冲液; 与此同时, 进行另外一组类似的平行处理(不加酶液), 作为空白对照, 并以 pH 6.8 磷酸缓冲液调零, 37℃ 保温 5 min 后, 于 420 nm 下测定 OD 值。酶活力以每毫升每分钟吸光度变化 0.01 为一个酶活力单位(U/(gFW·min))。

$$\text{酶活性} (0.01/(\Delta OD \cdot \min)) = \Delta OD / 0.01t \times D$$

$$\text{酶比活力} [0.01\Delta OD/(\text{gFW} \cdot \min)] = \Delta OD / (0.01FW \cdot t) \times D$$

式中, ΔOD 为反应时间内的光密度变化。FW 为样品鲜重。 t 为反应时间。 D 为稀释倍数, 即提取的总酶液为反应系统中酶液体积的倍数。

2 结果与分析

2.1 树冠不同方位果实表面温度及光照强度比较

就树冠不同方位而言, 果实表面温度在一天中不同时段有很大差异(图 1)。10:00~15:00, 随着树体受光角度的不断变化, 树冠上温度最高的果实所在的方位也会发生位移。由图 1 可以看出, 10:00~15:00, 随着时间的推移, 气温缓慢上升, 果实表面温度也逐渐上升; 东南、东北、内膛果实温度在 14:00 时达到最大值, 随后开始下降; 而西南方向果实表面温度却在 15:00 才达到最大值。从图中还可以看出, 10:00~15:00, 西南方向果实表面温度上升幅度远大于其他方位, 而且从 12:00 开

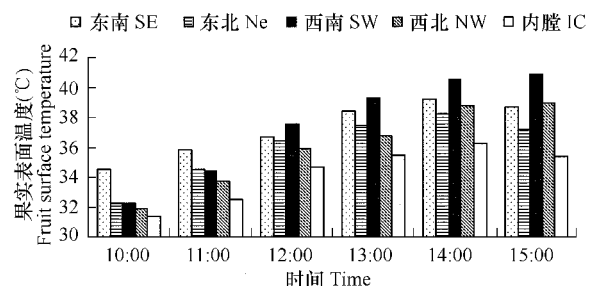


图 1 树冠不同方位果实不同时段表面温度比较

Fig. 1 Comparison of fruit surface temperatures among different exposures by time course

始果实表面温度一直保持最高。就一天中果实表面绝对最高温度而言,不同方位果实从大到小的顺序依次为:西南>东南>西北>东北>内膛。由此可见,同一树冠上的果实,由于一天中接受的太阳辐射能量不同,导致果实表面温度有较大差异。

同一树冠不同方位的果实所接受的光照强度具有很大差异(图2)。10:00~11:00,树冠东南方位果实接受的光照强度最强,11:00时为410 W/m²,到12:00东南和西南方位果实接受的光照强度基本相同,而以西南方向略高,分别为515 W/m²和519 W/m²。随后12:00~15:00较长的一段时间内,东南和东北方向果实接受的光照强度随时间的推移递减,而西南和西北方向则有规律地递增。由于内膛果实主要接受散射光,所以,光照强度在整个时段变化都不大,一直处于较低水平。一天中,以树冠西南方向果实所接受的光照强度为最强,且明显高于其他方位。同时,西南方向光照强度的变化幅度远高于树冠其他方位。由此可见,处于树冠不同方位的果实,在一天中所接受的光照强度不同,因而导致果实表面温度具有很大差异。西南方向果实接受的光照强度最强,果实表面温度也最高,因而是树冠上高温和强光胁迫发生的主要区域。

2.2 树冠不同方位果实表皮 PPO 活性比较

由图3可以看出,树冠不同方位果实表皮组织 PPO 活性有显著差异。其中,西南方位明显高于其它四个方位,达到极显著水平,果实表皮 PPO 活性比其它4个方位的平均值高20.86%。说明果实表皮 PPO 活性与树冠光照分布和果实表面温度变化有一定的相关性,树冠中受高温和强光胁迫程度较大的方位,果实表皮组织中 PPO 活性相应增强。由于生产上日烧果实一般多发生在树冠西南方位,这暗示着可能与该区域果实自然条件下 PPO 的高活性有一定的内在联系。

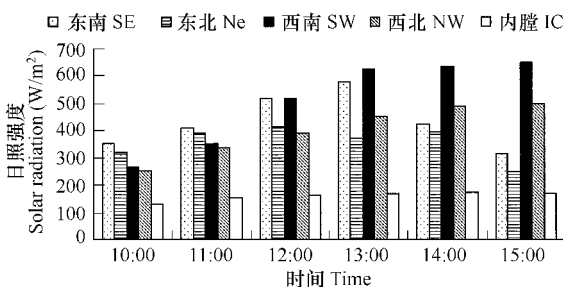


图2 树冠不同方位果实不同时段表面接受光照强度比较

Fig. 2 Comparison of solar radiation received by fruits among different exposures by time course

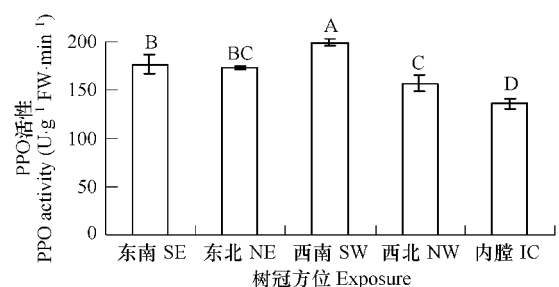


图3 树冠不同方位果实表皮 PPO 活性比较

Fig. 3 Comparison of PPO activity in fruit peel from different canopy exposures

2.3 不同日烧程度果实表皮 PPO 活性比较

不同日烧程度果实表皮 PPO 活性有显著不同(图4)。与正常果相比,白化果和褐变果中 PPO 活性都极显著增强,说明发生日烧的果实 PPO 活性很高,其催化的氧化反应必然剧烈。从图中还可以看出,与白化果相比,褐变果中 PPO 活性有所降低。原因可能是由于褐变症状出现后,反应底物逐渐减少,或许与 PPO“自杀抑制”作用有关^[12]。果实发生日烧,一般最初症状是出现白化,随后1~2d内再发生褐变,而且这是一个不可逆的过程。由此可以推断:在白化阶段, PPO 活性受到环境胁迫诱导而急剧升高,参与了大量的酚类物质转化为醌类物质的过程,最终导致果实出现褐变。

2.3 不同温度处理对果实表皮 PPO 活性变化的影响

不同温度处理对果实表皮 PPO 活性变化有很大影响(图5)。在一定温度范围内(25~48℃),随处理温度升高,胁迫作用增大, PPO 活性明显增强,且达到极显著水平。但如果温度继续升高,当达到55℃时,热伤害症状已经出现,此时 PPO 活性呈下降趋势。结果再次表明,果实褐变与高温胁迫下 PPO 活性的大幅度提高确实有密切联系。

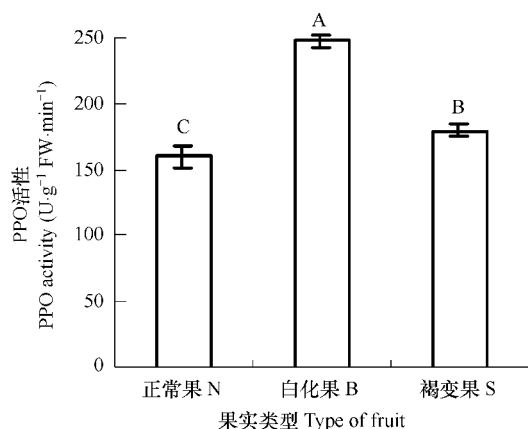


图4 不同日烧程度果实表皮 PPO 活性比较

Fig. 4 Comparison of PPO activity among different types of sunburn fruits

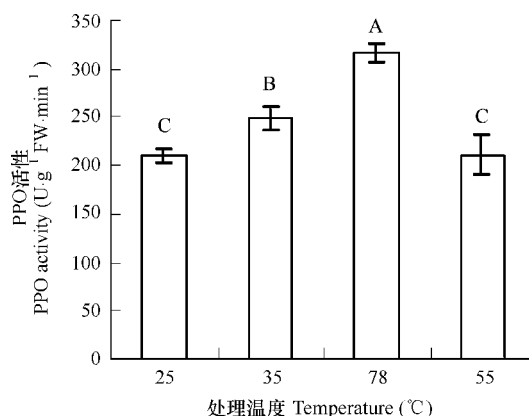


图5 高温胁迫下果实表皮 PPO 活性变化

Fig. 5 Changes of PPO activity in fruit peel under different high-temperature stresses

2.4 不同升温模式对果实表皮 PPO 活性的影响

不同升温模式果实表皮 PPO 活性的变化趋势如图 6 所示。3 种升温模式 PPO 的活性都明显高于对照, 达到极显著差异水平, 且直接升温处理(T_2)促使果实表皮组织 PPO 活性显著提高。说明如果果实缺乏温度驯化锻炼, 在短期内升温过快, 容易发生褐变日烧。这种推论与生产上的观察也是一致的。而 T_1 变温处理果实温度是一个逐渐上升的过程, T_3 变温处理是一个高低温波动变化的过程, 两种处理在一定程度上都有利于果实对高温胁迫的驯化, 因而 PPO 活性有降低的趋势。

2.5 不同光照强度对果实表皮 PPO 活性变化的影响

不同光照强度对果实表皮 PPO 活性变化的影响如图 7 所示。3 种不同处理 PPO 活性的变化趋势是随光照强度的增加, 酶活性也逐渐增强, 在自然光下裸露的果实表皮 PPO 活性比用黑布和遮阳网处理的平均值分别高 37.95% 和 26.37%, 且都达到差异显著水平。说明强光可以诱导 PPO 活性的提高。由于果实日烧与强光胁迫有直接关系, 所以, 就此推断: PPO 活性升高应该与强光胁迫下果实褐变直接相关。

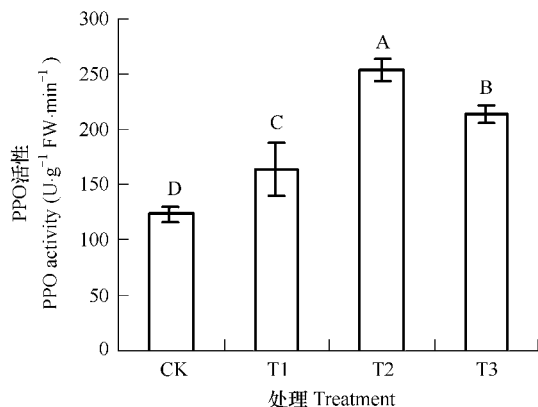


图6 不同升温模式果实表皮 PPO 活性变化

Fig. 6 Changes of PPO activity in fruit peel influenced by different temperature-rising modes

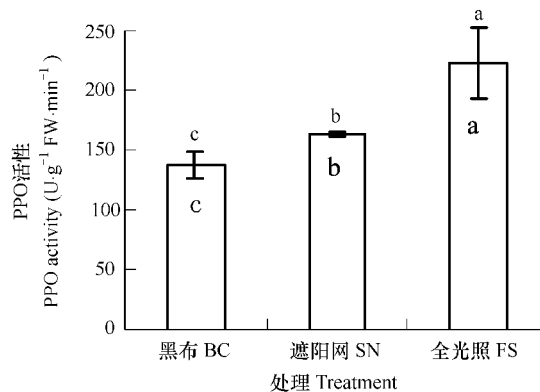


图7 不同光照强度果实表皮 PPO 活性比较

Fig. 7 Comparison of PPO activity in fruit peel at different light intensity

2.6 不同湿度对果实表皮 PPO 活性的影响

在同一温度条件下, PPO 活性随湿度的增加而降低; 而在同一湿度条件下, PPO 活性随温度的增加而上升, 且都达到显著水平 (图 8)。由此可见, 高温胁迫下, 低湿度更能加速诱导 PPO 活性的上升。比如, 在 48°C

时,30%湿度处理 PPO 活性达到最高值,比同温度高湿度处理提高 29.82%;比同湿度 30℃ 处理提高 32.98%。这与生产实践中,干燥高温条件下果实容易发生日烧的现象也是吻合的。

3 讨论

3.1 苹果果实日烧褐变与 PPO 活性的关系

一般认为,PPO 与植物的酶促褐变密切相关,并参与许多作物果实的氧化褐变过程^[13,14]。张晓燕等用不同温度处理白银豆植株,发现在高温胁迫(35℃ 和 40℃)下,叶片内 PPO 活性显著升高,由此提出在生产中预防 35℃ 以上的高温非常重要^[15]。本试验中,也证明果实日烧褐变确实与褐变前果皮 PPO 活性变化有密切联系。因为果实出现褐变症状前夕,PPO 活性达到最高峰。然而,也必须清楚地认识到:一般情况下,随着温度或光照胁迫程度的增加,虽然 PPO 活性不断上升,但果实并无褐变症状出现;只有当胁迫超过一定限度,才会导致褐变现象的发生。此外,尽管果实褪绿变白可以看作是 PPO 活性跃升的信号,但由于从褪绿变白到褐变症状出现是一个不可逆的过程,此时对于防止褐变发生显然为时已晚。所以,今后不仅应深入探索高温和强光胁迫下,果实褐变发生前 PPO 活性变化的临界指标,还应对果实发生日烧褐变过程中,PPO 催化酚氧化反应的时间和空间开展甄别研究。这样,才能更有效地确定适宜的调节途径与方法。

3.2 PPO 活性调节与热伤害预防

已有试验表明:通过改变环境条件和栽培技术可以调节 PPO 的活性,从而降低果实褐变的程度^[16~18]。张兰等证明热激处理可显著降低蚕豆在冷藏期间 PPO 活性,抑制褐变度的上升^[19]。本试验也看到,通过改变环境温度和湿度,确实能够在一定程度上抑制 PPO 活性。这就为今后研究环境调节方法提供了依据。此外,虽然 PPO 作用机理尚未完全阐明^[12],但已有试验表明:施用外源抗坏血酸、谷胱甘肽、水杨酸和柠檬酸等能够有效抑制不同作物果实或产品中 PPO 活性^[20,21]。因此,从已有结果推论:不论果实日烧褐变发生的机理如何,通过适当抑制 PPO 活性,是有可能在一定范围内减轻褐变程度的。就苹果生产而言,在容易发生果实日烧的环境条件下,采取综合技术措施,提高果园湿度,适当降低果实温度,都有利于抑制 PPO 的活性,从而降低果实发生褐变的机率。此外,今后还应有针对性地研究化学抑制 PPO 活性的途径和方法,以便更加经济有效地预防果实热伤害。

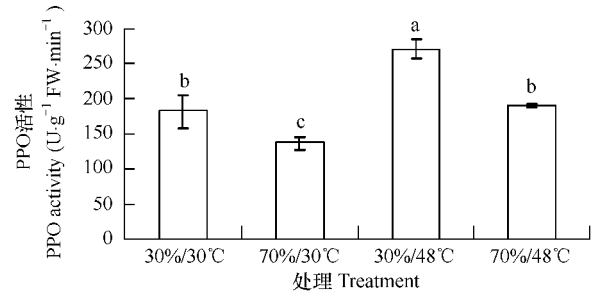


图8 不同温湿度处理果实表皮 PPO 活性比较

Fig. 8 Comparison of PPO activity in fruit peel at different temperatures and relative humidity

References:

- [1] Zhang J G, Li Y L, Liu Y F, *et al.* Effects of high temperature and excessive light on oxidative stress of apple fruit peel on different exposures of tree crown. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12):1976—1980.
- [2] Schrader L, Zhang J G, Sun J S. Environmental stresses that cause sunburn of apple. *Acta Horticulturae*, 2003, (618):397—405.
- [3] Zhang J G, Liu Y F, Sun J S, *et al.* Daily maximum fruit surface temperatures in relation to main meteorological factors in apples. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 850—855.
- [4] Schrader L, Zhang J G, Duplaga W. Two types of sunburn in apple caused by high fruit surface (peel) temperatures. *Plant Health Progress*, 2001 (Electronic journal).
- [5] Li Y L, Zhang J G. Advance in researches on apple fruit sunburn. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2003, 26(suppl.): 64—67.
- [6] Jiang Y M, Zhang Z Q, Joyce D C, *et al.* Inhibition of polyphenol oxidase and the browning control of litchi fruit by glutathione and citric acid. *Food Chemistry*, 1998, 62(1):49.
- [7] Ci Z J, Chen X S, Zhang L J, *et al.* Preliminary study on the mechanism of enzymatic browning in apricot fruits. *Shandong Agricultural Sciences*, 2006, (6):17—19.
- [8] Cai Q H. Study on the activity of polyphenol oxidase in longan fruits' pericarp. *Journal of Putian University*, 2006, (2): 11—13.

- [9] Guan J F, Ji H, Feng Y X, *et al.* The Correlation of peel browning spot with phenolics metabolism in Huangguan pears. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(6): 80—83.
- [10] Lin H T, Xi Y F, Chen S J. The Relationship between the desiccation-induced browning and the metabolism of active oxygen and phenolics in pericarp of postharvest longan fruit. *Acta Photophysiological Sinica*, 2005, 31 (3): 287—297.
- [11] Zhang Z L, ed. Guidance for Plant Physiology Experiments. Beijing: Higher Education Press, 1990. 148—153.
- [12] Lei D F, Feng Y, Jiang D Z. Characteristics of polyphenol oxidase in plants. *Advance in Natural Sciences*, 2004, 14(6): 606—614.
- [13] Hao Y Y, Huang W D. Changes in antioxidative system and cell ultrastructure in the fruit peels of apple during sunburn development. *Acta Photophysiological Sinica*, 2004, 30 (1): 19—26.
- [14] Seo J H. Changes of phenolic compounds and occurrence of skin browning and characterization of partially purified polyphenol oxidase in oriental pear fruits. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science*, 2001, 42(2): 184—189.
- [15] Zhang X Y, Liu P, Zhu J, *et al.* Study on effects of high temperature on resistance physiology of silvery beans. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2006, (7): 27—29.
- [16] Li X J, Zhu J T, Zhong F. Characteristics of polyphenol oxidases from Jiubao peaches. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2003, 26(2): 30—32.
- [17] Cheng J J, Ma Y, Yang Y L, *et al.* Study on characteristics of polyphenol oxidase in Pingguoli pear. *Acta Horticulturae Sinica*, 2002, 29(3): 261—262.
- [18] Chen C G, Chen B. Effect of temperature, lemon acid and ascorbic acid on polyphenol oxidase activity of honey from *S. octophylla* (Lour.) Harms. *Journal of Bee*, 2005, 25(12): 3—5.
- [19] Zhang L, Zheng Y H, Wang F, *et al.* Effect of heat shock treatment on browning and related enzyme activities in cold-stored broadbean seeds. *Acta Photophysiological Sinica*, 2003, 29(4): 327—331.
- [20] Chang C, Zhang H P, You M S, *et al.* Inhibiting polyphenol oxidase activity in wheat by ascorbic acid. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2007, (1): 16—19.
- [21] Liu L, Li J, Qin W M. Effect of SA on POD, PPO and PAL activities and fruit quality in Korla's Xiangli pear. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2005, 42(2): 98—101.

参考文献:

- [1] 张建光,李英丽,刘玉芳,等. 高温、强光对苹果树冠不同方位果皮的氧化胁迫研究. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 1976—1980.
- [5] 李英丽,张建光. 苹果果实日灼研究进展. *河北农业大学学报*, 2003, 26(增刊): 64—67.
- [7] 慈志娟,陈学森,张立杰,等. 杏果实酶促褐变机理的研究初报. *山东农业科学*, 2006, (6): 17—19.
- [8] 蔡其洪. 龙眼果皮中多酚氧化酶活性的研究. *莆田学院学报*, 2006, (2): 11—13.
- [9] 关军锋,及华,冯云霄,等. 黄冠梨果皮褐斑病与酚类物质代谢的关系. *华北农学报*, 2005, 20(6): 80—83.
- [10] 林河通,席珂芳,陈绍军. 龙眼果实采后失水果皮褐变与活性氧及酚类代谢的关系. *植物生理与分子生物学学报*, 2005, 31 (3): 287—297.
- [11] 张志良主编. 植物生理学实验指导. 北京:高等教育出版社, 1990. 148—153.
- [12] 雷东锋,冯怡,蒋大宗. 植物中多酚氧化酶的特征. *自然科学进展*, 2004, 14(6): 606—614.
- [13] 郝燕燕,黄卫东. 苹果日烧病程中果皮抗氧化系统在细胞超微结构的变化. *植物生理与分子生物学学报*, 2004, 30 (1): 19—26.
- [15] 张晓燕,刘鹏,朱佳,等. 高温胁迫对白银豆抗性生理的影响研究. *广东农业科学*, 2006, (7): 27—29.
- [16] 李秀锦,朱京涛,仲飞. 大久保桃果实多酚氧化酶某些特性的研究. *河北农业大学学报*, 2003, 26(2): 30—32.
- [17] 程建军,马莺,杨咏丽,等. 苹果梨中多酚氧化酶酶学特性的研究. *园艺学报*, 2002, 29(3): 261—262.
- [18] 陈崇羔,陈斌. 温度、柠檬酸和抗坏血酸对冬蜜中多酚氧化酶活性的影响. *蜜蜂杂志*, 2005, 25(12): 3—5.
- [19] 张兰,郑永华,汪峰,等. 热激处理对冷藏蚕豆种子褐变和有关酶活性的影响. *植物生理与分子生物学学报*, 2003, 29(4): 327—331.
- [20] 常成,张海萍,尤明山,等. 抗坏血酸对小麦多酚氧化酶活性抑制的研究. *中国粮油学报*, 2007, (1): 16—19.
- [21] 刘玲,李疆,覃伟铭. 水杨酸对库尔勒香梨 POD、PPO、PAL 活性及其对果实品质的影响. *新疆农业科学*, 2005, 42(2): 98—101.